

Conversion photovoltaïque

EXERCICE 1 : Rayonnement solaire et le rendement limite

Une cellule photovoltaïque idéale (modèle de Shockley-Queisser) est éclairée par un spectre *AM1.5G* de puissance totale 1000 W/m^2 . On suppose que tous les photons d'énergie $E \geq E_g$ sont absorbés et contribuent à un photocourant idéal.

Données : Constante de Planck $h=6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, vitesse de la lumière $c=3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$, charge élémentaire $q=1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$, température de cellule $T=300 \text{ K}$, constante de Boltzmann $k=1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

1. Calculer la longueur d'onde de coupure λ_c pour une cellule au silicium ($E_g=1,12 \text{ eV}$). Que représente physiquement cette longueur d'onde ?
2. Estimer le courant de court-circuit maximal I_{sc} dans un 1 mètre si le nombre de photons incidents avec $\lambda \leq \lambda_c$ est de $2,8 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
3. La tension de circuit ouvert est donnée par $V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1)$. Pour une diode idéale ($n=1$) et un courant de saturation $I_0=1 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$, calculer V_{oc} .
4. Déterminer le facteur de forme maximal FF (approximation de Shockley) à partir de la formule $FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1}$ où $v_{oc} = \frac{qV_{oc}}{nkT}$. En déduire le rendement limite η .
5. Conclusion : Comparez ce rendement limite (environ 33 % pour le silicium) aux rendements des cellules commerciales (18-22 %). Quelles sont les principales pertes non prises en compte dans ce modèle idéal?

EXERCICE 2: Modèle à une diode

Une cellule photovoltaïque réelle est modélisée par le schéma équivalent à une diode, sans résistances parasites ($R_s=0, R_{sh}=\infty$). L'équation est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]$$

Données : $I_{ph}=3,5 \text{ A}$, $I_0=2 \times 10^{-7} \text{ A}$, $n=1.3$, $T=298 \text{ K}$.

1. Tracer qualitativement la courbe $I(V)$ pour V allant de 0 à V_{oc} . Identifier les régions de générateur de courant, de générateur de tension, et de dissipation.
2. Calculer la tension de circuit ouvert V_{oc} en résolvant $I=0$.
3. Calculer la puissance maximale P_{max} en utilisant la condition $\frac{dP}{dV} = 0$ (on admettra que $V_{mpp} \approx V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1)$ ou effectuer une résolution itérative). On donne $V_{mpp} \approx 0,52 \text{ V}$.
4. En déduire le courant I_{mpp} et la puissance maximale. Calculer le facteur de forme $FF = P_{max}/(V_{oc}I_{sc})$.

- Conclusion : Comment le facteur d'idéalité n influence-t-il R_{sh} et FF ? Si n passe à 1,8, la cellule serait-elle meilleure ? Justifier.

EXERCICE 3 : Prise en compte des résistances série et shunt

Une cellule photovoltaïque est maintenant modélisée par le circuit à une diode avec résistances série R_s et shunt R_{sh} . L'équation est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Données : $I_{ph}=3,2 \text{ A}$, $I_0=1 \times 10^{-8} \text{ A}$, $n=1,2$, $R_s=0,05 \Omega$, $R_{sh}=100 \Omega$, $T=300 \text{ K}$.

- En négligeant d'abord R_{sh} , calculer la chute de tension due à R_s à $I=I_{sc} \approx I_{ph}$. En déduire la tension aux bornes de la diode. Comparer avec le cas $R_s=0$.
- En négligeant R_s , évaluer la perte de courant par R_{sh} quand $V=0,5 \text{ V}$ (avec $I \approx 2,8 \text{ A}$). Commenter.
- Résoudre numériquement (ou graphiquement) la valeur de V_{oc} avec les deux résistances. On pourra utiliser une approximation : à V_{oc} , $I=0$ donc

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{nkT} \right) \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

- Calculer la puissance maximale en utilisant la méthode de votre choix (itération ou point de fonctionnement donné par le constructeur). On donne $V_{mpp}=0,48 \text{ V}$ et $I_{mpp}=2,9 \text{ A}$. Comparer avec le cas idéal (exercice 2).
- Conclusion : Expliquer pourquoi R_s réduit le facteur de forme et R_{sh} réduit plutôt V_{oc} . Quelle valeur limite de R_{sh} serait acceptable pour ne pas perdre plus de 1 % de puissance ?

EXERCICE 4 : Association en série et effet de l'ombrage

Un module photovoltaïque est constitué de 36 cellules identiques (modèle de l'exercice 3, sans R_s ni R_{sh} pour simplifier, mais avec $I_{ph}=3 \text{ A}$, $I_0=2 \times 10^{-8} \text{ A}$, $n=1,2$) montées en série. Une cellule est partiellement ombragée, ce qui réduit son photocourant à 1 A. Le module est connecté à une charge.

- Quelle est la caractéristique $I(V)$ du module lorsque toutes les cellules sont uniformément éclairées (courant unique) ? Donner V_{oc} , module et I_{sc} , module.
- En présence de la cellule ombragée, expliquer pourquoi le courant du module ne peut pas dépasser 1 A si on néglige les diodes bypass. Que se passe-t-il à $I > 1 \text{ A}$?
- On place une diode bypass en parallèle sur chaque cellule (ou groupe de 18 cellules). Pour un courant de module $I=2,5 \text{ A}$, déterminer la tension aux bornes de la cellule ombragée (qui est alors polarisée en inverse). La diode bypass conduit lorsque la tension inverse atteint $-0,6 \text{ V}$. Que se passe-t-il ?
- Calculer la puissance délivrée par le module avec ombrage (sans bypass) pour un courant imposé de 1,2 A, puis avec bypass actif. Conclure sur l'utilité des diodes.
- Conclusion : Proposer une stratégie d'optimisation du nombre de cellules par diode bypass pour un champ photovoltaïque soumis à un ombrage partiel et mobile (ex : ombre d'un arbre). Quels risques si le nombre est trop faible ou trop élevé ?

EXERCICE 5 : Extraction des paramètres à partir de mesures réelles

Un laboratoire a mesuré la caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque polycristalline sous éclairement 1000 W/m^2 à 25°C . Les points remarquables sont :

$$I_{sc}=8,2 \text{ A (à } V=0), V_{oc}=0,62 \text{ V (à } I=0),$$

$$P_{max}=4,1 \text{ W à } V_{mpp}=0,51 \text{ V et } I_{mpp}=8,04 \text{ A.}$$

On a également mesuré les pentes du courant par rapport à la tension aux deux extrémités :

- $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I_{sc}} = -0.02 \text{ A/V}$
- $\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_{oc}} = -80 \text{ A/V}$

On souhaite identifier les paramètres du modèle à une diode avec résistances série R_s et shunt R_{sh} .

1. Estimation de I_{ph} et R_{sh}

En court-circuit, le courant de la diode et le courant shunt sont négligeables. On pose donc $I_{ph} \approx I_{sc} = 8,2 \text{ A}$. La

pente au voisinage de I_{sc} est reliée à la résistance shunt par : $R_{sh} \approx - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{sc}}$

Calculer R_{sh} . Commenter sa valeur (est-elle typique pour une cellule polycristalline ?).

2. Estimation de R_s à partir de la pente près de V_{oc}

Lorsque la cellule est en circuit ouvert, la pente est dominée par la résistance série (si R_{sh} est suffisamment

grande). On utilise l'approximation : $R_s \approx - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc}} = \frac{1}{\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_{oc}}}$

Calculer R_s . Cette valeur est-elle réaliste pour une cellule individuelle ? Justifier.

3. Détermination du facteur d'idéalité n et du courant de saturation I_0

On néglige dans un premier temps l'effet de R_s et R_{sh} sur la tension de circuit ouvert. L'équation de V_{oc} s'écrit:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right)$$

Données : $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T = 298 \text{ K}$, $q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

- Calculer la tension thermique $V_{th} = kT/q$.
- En prenant $n = 1,2$ (valeur typique), calculer I_0 .
- Que deviendrait I_0 si n était égal à $1,0$? Conclure sur la sensibilité du modèle.

4. Vérification de la cohérence du modèle

À l'aide des paramètres trouvés (I_{ph} , R_{sh} , R_s , n , I_0), calculer le courant I_{mpp} théorique à $V_{mpp} = 0,51$ V en résolvant l'équation implicite :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + IR_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

On pourra procéder par itération (une seule itération suffit si l'on part de $I = I_{mpp}$ mesuré). Comparer avec $I_{mpp} = 8,04$ A. Discuter l'accord.

5. Conclusion

Le modèle à une diode est-il suffisant pour décrire cette cellule ? Quelles sont les limites de ce modèle (recombinaisons, non-linéarité de R_{sh} , etc.) ? Proposer une amélioration possible (modèle à deux diodes) et expliquer brièvement son intérêt.