

Het maximale vermogen van een zonnecel

Victor Vreede

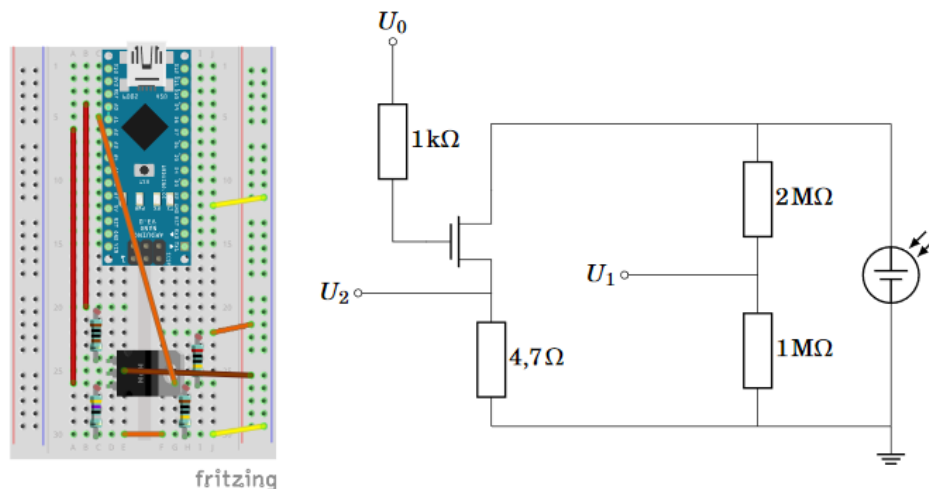
12862622

20 december 2020

1 Introductie

Met de energietransitie om de deur is maken zonnepanelen een steeds groter aandeel van de Nederlandse energievoorziening. Het is hiervoor van belang dat een zonnecel altijd het maximale vermogen levert. In dit verslagje leg ik uit hoe je met een Arduino het vermogen van een zonnecel kan regelen.

2 Theorie



Figuur 1: De gebruikte schakeling om het vermogen van de zonnecel te regelen.

De aangesloten halfgeleider, een MOSFET, heeft de bijzondere eigenschap dat de weerstand variabel is. Bij een lage gate-voltage is de weerstand hoog, en bij een hoge gate-voltage is de weerstand bijna 0. Dit is van belang, want als men de belastingsweerstand R_b kan regelen,

kan men het vermogen van het paneel beïnvloeden.

De spanning die de zonnecel levert is gelijk aan 3 maal de spanning U_1 . Dit komt doordat de $2M\Omega$ en $1M\Omega$ weerstanden samen een 2:1 spanningsdeler vormen. Het totale uitgaande voltage van de zonnecel is dus $V_{\text{out}} = 3V_1$. De uitgaande stroomsterkte van de zonnecel is ongeveer gelijk aan $I_{\text{out}} = \frac{V_2}{R_3}$, met $R_3 = 4.7\Omega$. Merk op dat dit vooral geldt als de weerstand van de MOSFET laag is, want dan staat volledige spanning van de zonnecel over R_3 tak. Merk op dat bij hogere weerstanden van de MOSFET er toch al amper stroom loopt vanuit de zonnecel (er is enkel een hoog voltage), en dan is de gemeten V_2 gelijk aan 0.

De karakteristiek van een zonnecel is als volgt:

$$I(V) = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right). \quad (1)$$

Hierbij is e het elementair ladingsquantum, k de constante van Boltzmann, en T de temperatuur. Verder is V de spanning over de zonnecel.

Als men I_{out} en V_{out} meet voor verschillende weerstanden van de MOSFET, kan men vergelijking (1) fitten met I_L en I_0 als parameters. Verder is het vermogen van de zonnecel gelijk aan

$$P_{\text{out}} = I_{\text{out}} V_{\text{out}}.$$

Als men $I(V)$ heeft bepaald met behulp van een fit, kan men vervolgens ook $P(V)$ bepalen. Verder kan men numeriek ook het maximum van $P(V)$ bepalen, het maximale vermogen van de zonnecel.

3 Maximum point power tracking

Er zijn echter ook andere manieren om het maximale vermogen van de zonnecel te bepalen. Merk op dat de methode beschreven in de theorie een voor- en nadelen heeft:

- De methode is erg precies, en relatief ongevoelig voor grote individuele meetonzekerheden.
- De methode is echter relatief traag, en er moeten metingen gedaan worden op veel punten. Dit betekent dat het geleverde vermogen van de zonnecel tijdens het meetproces niet maximaal is.

Deze sectie beschrijft een andere, iteratieve methode om het maximale vermogen te bepalen. De methode werkt als volgt. Men kiest 2 input voltages a, b waarvan men zeker weet dat het maximum ertussen ligt. De volgende stappen worden herhaald:

1. Het vermogen wordt gemeten op input voltages a en b , laten deze vermogens gelijk zijn aan P_a en P_b .
2. Als $P_a > P_b$, dan ligt het maximum vermogen dichterbij a dan bij b . Neem nu $a' = a$ en $b' = \frac{a+b}{2}$, en herhaal de stappen met a' en b' .

3. Als $P_b > P_a$, dan ligt het maximum vermogen dichterbij b dan bij a . Neem nu $a' = \frac{a+b}{2}$ en $b' = b$, en herhaal de stappen met a' en b' .

Na een bepaald aantal stappen zal gelden dat $b - a < \varepsilon$, met $\varepsilon > 0$. Hierbij is ε een vooraf bepaalde convergentie straal.

Voordelen van deze methode zijn:

- De methode is snel: De tijd nodig om een precisie van $n = \varepsilon^{-1}$ te bereiken is $O(\log(n))$.
- Gedurende de uitvoering van de methode is het vermogen bijna maximaal, en toenevend.

Een nadeel van de methode is het optimale resultaat erg afhankelijk kan zijn de initiële (a, b) , en van individuele meetfouten. Dit eerste probleem kan worden opgelost door vooraf een I, V scan te doen, en hieruit geschikte (a, b) te kiezen. De ernst van het tweede probleem kan worden verminderd door

- de meting van P_a en P_b vaker te herhalen;
- een transformatie in de vorm van $a = (c)a + (1 - c)b$, met $\frac{1}{2} \leq c < 1$ te gebruiken. (Idem dito voor b). Hierdoor convergeert de meting langzamer, maar wel met meer zekerheid.

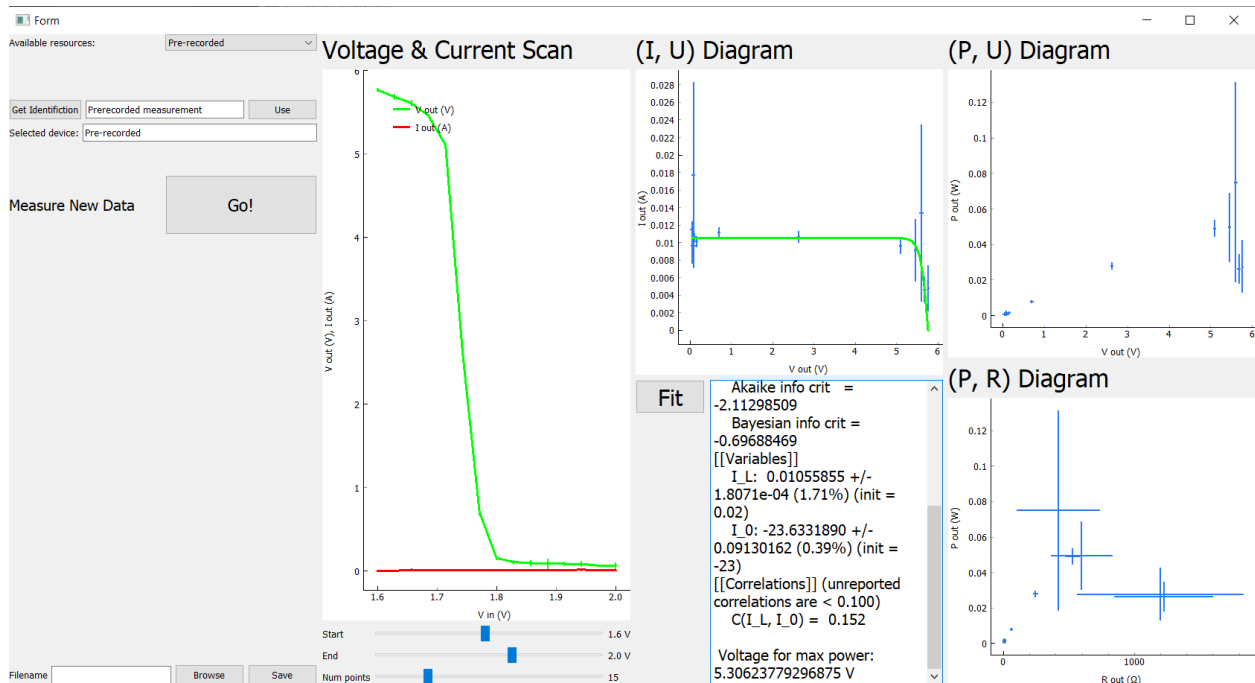
4 Implementatie

Om de $I-U$ karakteristiek (en meer) te meten is het bijgevoegde programma (ook te vinden op Github¹) toegevoegd. Hier een overzicht van de functionaliteit van het programma.

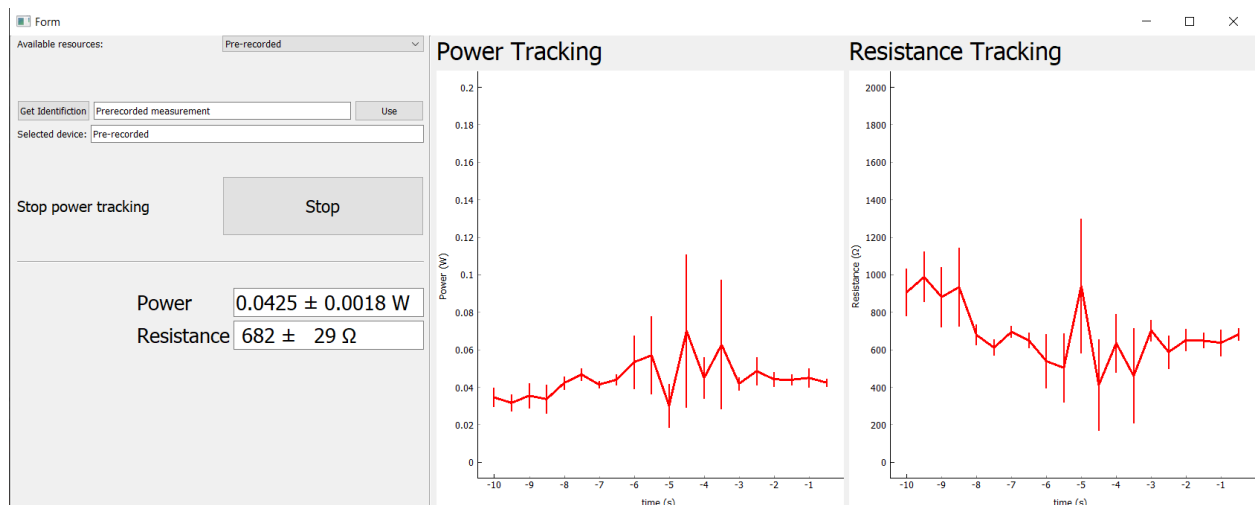
Na het installeren kan men het commando `interface run` gebruiken om de applicatie te runnen. Men kan het device links selecteren, met de *mogelijkheid* om het ‘PreRecordedDevice’ te gebruiken. Bij de ‘voltage & Current Scan’ kan de scan range ingesteld worden. Verder zijn er diagrammen voor (I, U), (P, U) en (P, R) grafieken. Als er data gemeten is, de (I, U) diagram gefit worden met vergelijking (1). Er is vervolgens een fit rapport te lezen, en het voltage voor maximaal vermogen wordt ook gegeven. Linksonder kan de data ook worden opgeslagen. Een *Voorbeeld* van het interface is te zien in figuur 2.

Verder is er een tweede programma het vermogen P ten opzichte van de tijd te ‘tracken’. Hiervoor kan men het commando `power run` gebruiken. Opnieuw kan het device gekozen worden, en er zijn twee grafieken te zien. Één van het vermogen en één van de weerstand ten opzichte van de tijd. Deze worden ieder halve seconde geüpdatet. Verder wordt het vermogen ieder 5 seconden aangepast, met de manier als in de theorie beschreven. Ook is het mogelijk het ‘tracking’ te stoppen. Een screenshot van het programma is te zien in figuur 3.

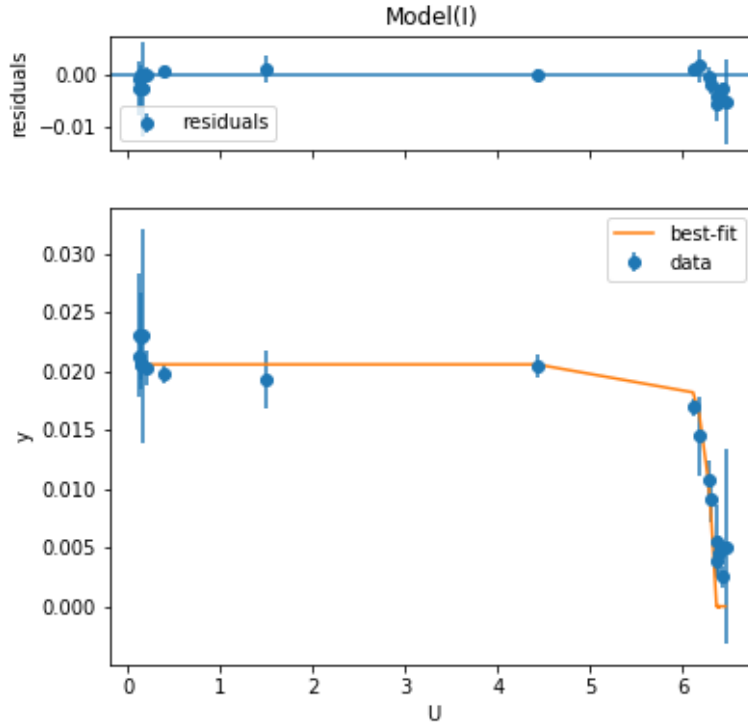
¹Kies de branch `solar.cell`.



Figuur 2: Een voorbeeld van het interface om de Zonnecel door te meten.



Figuur 3: Een voorbeeld van de Power-tracking software.



Figuur 4: Met Lmfit is een fit gedaan, hier de data en dit fit. Verder zijn de foutenmarges te zien. De fit was zoals vergelijking (1).

5 Analyse

Van één meting met de Zonnecel (Verzameld met eigen schakeling) is de data opgeslagen en geanalyseerd. Er is een fit gedaan op dezelfde manier als in het programma, de resulterende (I, U) plot is te zien in figuur 4. De fit was gedaan van het volgende verband:

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right).$$

Zie eventueel vergelijking (1). Er is $n = 5$ genomen voor de fit, uit de fit bleek dat $I_L = 20.60 \pm 0.46 \text{ mA}$ en $I_0 = (2.27 \pm 0.35) \times 10^{-26} \text{ A}$. Verder had de fit een gereduceerde χ^2 gelijk aan 2.1. (Er waren 20 meetpunten.) Met behulp van deze parameters is ook het maximale vermogen bepaald. Deze kwam neer op $P = 0.1193 \pm 0.0027 \text{ W}$. Verder was de weerstand bij maximaal vermogen gelijk aan $R = 290.8 \pm 6.7 \Omega$.

6 Conclusie

Het is duidelijk dat het mogelijk is om het geleverde vermogen van een zonnecel te bepalen met de juiste schakeling. Er zijn verschillende manier om het maximale vermogen van een

zonnecel te bepalen, namelijk door te fitten, of door een iteratieve methode. Beide methodes zijn verder geïmplementeerd.